

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.03.025

## 基于包络线的非对称短路电流参数计算方法研究

郭双权<sup>1</sup>, 陈家伟<sup>2</sup>, 阎对丰<sup>2,3</sup>, 马建军<sup>1</sup>, 王金鑫<sup>1</sup>

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830011; 2. 西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710077;  
3. 西安交通大学, 西安 710049)

**摘要:** 针对电力系统非对称短路电流参数计算中包络线位置偏移而产生的电流有效值与直流分量误差问题,文中提出一种新的包络线切点修正方法。首先对非对称短路电流波形进行基线校正和小波去噪预处理。其次,通过局部极值点抛物线拟合的方式精确提取电流峰值及时间参数;利用这些峰值集合进行初步包络线拟合,进而计算非对称短路电流直流分量。接着,从原电流波形中剔除直流分量,得到对称分量电流峰值和时间集合,将其作为真实包络线拟合点集合。最后,进一步以修正后的切点集合重构包络线函数,从而优化有效值与直流分量的计算模型。实验对比结果显示:该修正方法显著提高了电流有效值的计算准确度,其相对误差由原方法的0.014%~0.184%降低至0%~0.042%;直流分量的相对误差从0.114%~0.625%降至0.093%~0.481%。这种方法为非对称短路电流参数的高准确度计算提供了有效的解决方案,尤其适用于直流分量时间常数超标的复杂工况。

**关键词:** 非对称短路电流; 包络线切点; 有效值计算; 直流分量; 参数修正

### Research on Asymmetrical Short-circuit Current Parameters Calculation Method Based on Envelope

GUO Shuangquan<sup>1</sup>, CHEN Jiawei<sup>2</sup>, YAN Duifeng<sup>2,3</sup>, MA Jianjun<sup>1</sup>, WANG Jinxin<sup>1</sup>

(1. State Grid Xinjiang Company Limited Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, China; 2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd, Xi'an 710049, China; 3. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** As for the errors in current root-mean-square (RMS) and DC component component due to the positional deviation of the envelope in the calculation of asymterical short-circuit current parameters in power systems, an improved method based on envelope tangent point correction is proposed in this paper. First, the baseline correction and wavelet denoising preprocessing of the asymmetrical short-circuit current waveform are performed. Then, the current peaks and time parameter are accurately extracted through parabolic fitting of local extreme points. With these peaks, an initial envelope fitting is conducted to calculate the DC component of the asymmetrical short-circuit current. After that, the DC component is removed from the original waveform, a symmetrical component current peak and time set is obtained and used as the true envelope tangent points. Finally, the envelope function is reconstructed with the corrected tangent points so to optimize the calculation models for the RMS value and DC component. The experimental comparison result shows that the proposed method has significantly improved the calculation accuracy of current RMS, the relative error is reduced from 0.014% - 0.184% (original method) to 0%-0.042%. The relative error of the DC component is decreased from 0.114% - 0.625% to 0.093% - 0.481%. This method provides an effective solution for high-precision parameter calculation of asymmetrical short-circuit currents in power systems and is especially suitable for complex operating conditions with excessive DC component time constants.

**Key words:** asymmetric short - circuit current; envelope tangent points; RMS calculation; DC component; parameter correction

## 0 引言

随着电力系统的发展电网规模不断扩大,高阻抗变压器和限流电抗器被大量使用,这使得电网的 $X/R$ 比值不断增大,电网短路电流直流分量衰减时间常数也不断增加,电源及负荷密集区域短路电流直流分量超标的问题日益突出。电力系统中,较大的短路电流直流分量严重影响断路器的开断性能<sup>[1]</sup>。高压断路器试验标准 IEC 62271-100:2021 及 GB/T 1984—2024 中,对于断路器非对称开断性能的验证,依据不同电压等级,主要考察断路器开断时间常数为 120、75、65、45 ms 时的短路开断性能<sup>[2-3]</sup>。随着电网容量不断增大,在某些情况下直流分量时间常数甚至能达到 150 ms 以上。由于系统直流分量超标,非对称短路电流参数计算显得更为重要,其有助于确定系统等效开断能力。

非对称短路参数计算主要涉及电流峰值、峰值时间、电流有效值、直流分量等内容。文[4]推荐了电流峰值、电流有效值和直流分量的计算方法,其中电流有效值和直流分量采用三峰值法<sup>[4]</sup>。不过,此方法在短路电流起始阶段非对称性较强部分的计算误差较大。文[5-7]通过设计短路电流波形表达式,利用电流波形中较易获取的特征参数(如电流峰值、峰值时间、电流过零点斜率等),反算出电流波形表达式中的未知参数,进而得到非对称短路电流完整的特征参数集。但实际上,系统或大容量实验室中的短路电流波形通常包含多个瞬态过程,电流有效值、直流分量、频率等重要特征参数难以定量表征,所以假定的短路电流波形表达式仅局部适用,不具备全域适用性。文[8]不依赖假定某种电流表达式,而是采用计算电流峰值和全域拟合的方法,利用峰值作包络线来获取非对称短路电流波形的特征参数集,满足了工程需求。然而,该方法忽略了一个情况,即非对称短路电流与外包络线的切点不在峰值处,若以电流峰值为拟合点,实际作出的“包络线”为割线,并非真正意义上的外包络线,并且非对称短路电流半波正、负极性在这方面的偏差正好相反,这进一步增大了计算偏差。

文中通过理论计算得出非对称短路电流包络线的真实切点时刻应为其对称分量的峰值时刻,基于此论点提出了新的非对称短路电流参数计算方法,首先在原始波形上按照非对称短路电流峰值点计算初始包络线;然后,去除原始波形直流分量后得到其对称分量,以对称分量的峰值时刻和原始波

形对应时刻的瞬时值作为真实包络线的切点集合重新计算包络线;最后按照标准<sup>[9]</sup>中推荐的方法得到非对称短路电流特征参数,并与现有文献的结果进行对比分析,证明了该论点及方法的有效性。

## 1 非对称短路电流包络线切点计算问题

在电力系统中,非对称短路电流主要在故障(例如短路故障)等情况下出现,这种电流之所以呈现非对称性,主要是因为短路瞬间回路电感中的电流不能突变。非对称短路电流通常由对称分量和非对称分量构成,其中非对称分量会随着时间按指数规律衰减。以一相为例,波形见图 1。

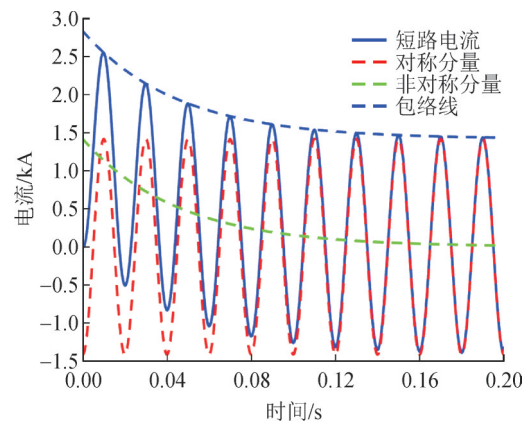


图1 单相非对称短路电流波形

Fig. 1 Single phase asymmetrical short-circuit current waveform

短路电流的表达式为

$$i = \sqrt{2} I_{ms} \sin(2\pi ft + \alpha - \varphi) - \sqrt{2} I_{ms} \sin(\alpha - \varphi) e^{-t/\tau} \quad (1)$$

式(1)中: $I_{ms}$ 为短路电流对称分量的有效值,与系统电压、短路回路阻抗等因素有关; $f$ 为系统频率; $\alpha$ 为短路发生时刻电压的相位角; $\varphi$ 为短路回路的阻抗角, $\varphi = \arctan(X/R)$ ,其中 $X$ 为短路回路的电感, $R$ 为短路回路的电阻; $\tau$ 为非对称短路电流的时间常数, $\tau = X/R$ 。

以式(1)为例,为方便计算,设 $I_{ms} = 1$  kA, $(\alpha - \varphi) = -\pi/2$ , $f = 50$  Hz, $\tau = 45$  ms,则式(1)变为

$$i = \sqrt{2} \sin(100\pi t - \pi/2) + \sqrt{2} e^{-t/0.045} \quad (2)$$

其理论包络线表达式为

$$i_{en} = \sqrt{2} + \sqrt{2} e^{-t/0.045} \quad (3)$$

非对称短路电流最大峰值对应的的时间和数值为(9.816 7 ms, 2.548 9 kA);理论包络线与非对称短路电流的切点对应的的时间和数值为(10 ms, 2.546 6 kA)。

由此可见,非对称短路电流波形的外包络线切点实际上为对称分量的峰值时刻,而不是非对称短路电流峰值时刻,见图 2。以正半波为例,切点应在

电流峰值偏右;同理,负半波的切点应在电流峰值偏左。从而导致所作“包络线”与实际包络线分别偏差 $\Delta y_+$ 和 $\Delta y_-$ ,且方向相反,而依据文[4,9]计算电流有效值、直流分量均是以上、下包络线为基准,见图3。如若按式(4)、(5)计算,因此会引入 $|\Delta y_+|+|\Delta y_-|$ 的误差。

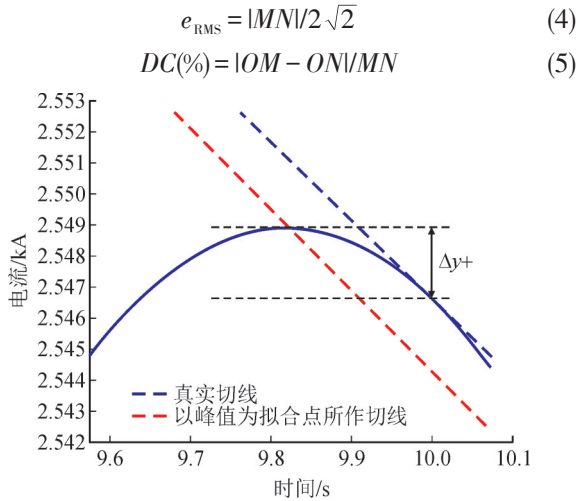


图2 非对称短路电流与包络线实际切点

Fig. 2 The actual tangent points between the asymmetric short-circuit current and the envelope

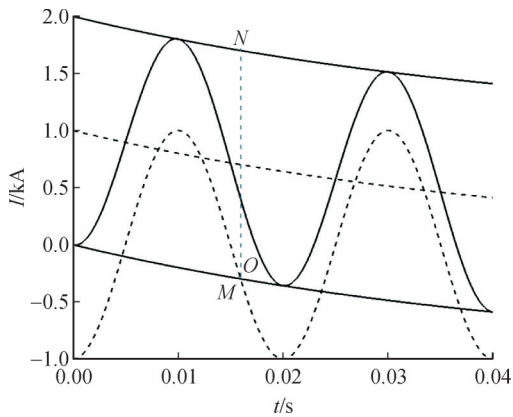


图3 非对称短路电流有效值和直流分量计算图示

Fig. 3 Diagram for calculating the RMS and DC component of asymmetric short-circuit current

## 2 非对称短路电流特征参数的修正计算方法

### 2.1 非对称短路电流波形预处理

对采集到的非对称短路电流波形进行消除零线漂移和噪音。消除零线漂移采用的方法是取电流波形起始前一段20 ms采样数据的平均值为基线值,将非对称短路电流数据减去该基线值,得到以零线为基线的非对称短路电流波形;消除噪音采用的方法是基于小波去噪的原理将非对称短路电流波形中包含的高频干扰信号进行过滤,使电流波形趋于光滑。

### 2.2 非对称短路电流峰值和峰值时间计算

在每个非对称短路电流半波范围内确定局部极值点 $(t_p, I_p)$ ,以该点为中心,两侧各再取相邻的 $P$ 个点,其中 $P=T \cdot f_s/10$ ;  $T$ 为电流的周期; $f_s$ 为电流的采样频率。对确定的离散数据集合,基于最小二乘法原理进行抛物线拟合,得到函数 $i(t)=at^2+b \cdot t+c$ ,当 $t=-b/(2 \cdot a)$ 时,函数 $i(t)$ 的极值可作为非对称短路电流峰值的近似值 $I_{\text{peak}}$ ,由此可计算出非对称短路电流峰值和峰值时间。

### 2.3 非对称短路电流的初始包络线计算

将2.2节中计算得到的非对称短路电流峰值和峰值时间按照正、负半波进行划分,分别得到两个峰值点集合 $\{t_{i+}, I_{i+}\}, i=1, 2, \dots, m$ 和 $\{t_{j-}, I_{j-}\}, j=1, 2, \dots, n$ ,其中,“+”表示正半波,“-”表示负半波, $i$ 和 $j$ 分别表示正半波和负半波的峰值序号, $m$ 和 $n$ 分别表示正半波和负半波的峰值个数。

假定以指数函数为基函数的非对称短路电流包络线函数,则

$$E(t) = \sum_{k=1}^4 a_k e^{-t/\tau_k} \quad (6)$$

式(6)中: $a_k$ 为相应时间常数指数函数的贡献因子; $\tau_1=45 \text{ ms}$ ;  $\tau_2=60 \text{ ms}$ ;  $\tau_3=75 \text{ ms}$ ;  $\tau_4=120 \text{ ms}$ 。

基于最小二乘法,利用峰值点集合 $\{t_{i+}, I_{i+}\}, \{t_{j-}, I_{j-}\}$ 对包络线函数进行拟合,得到 $a_{k+}$ 和 $a_{k-}$ ,分别对应上、下两条包络线 $E_{\text{top}}(t)$ 函数和 $E_{\text{bottom}}(t)$ ,使得峰值点距离包络线最近。

### 2.4 非对称短路电流的切点计算

根据式(7),由 $E_{\text{top}}(t)$ 和 $E_{\text{bottom}}(t)$ 计算出非对称短路电流的直流分量函数 $i_{\text{dc}}(t)$

$$i_{\text{dc}}(t) = [E_{\text{top}}(t) + E_{\text{bottom}}(t)]/2 \quad (7)$$

将实际电流中的直流分量函数 $i_{\text{dc}}(t)$ 剔除后得到交流分量函数 $i_{\text{ac}}(t)$ 。

以 $i_{\text{ac}}(t)$ 函数为分析对象,重复2.2节,得到交流分量峰值时间集合,该集合即是实际非对称短路电流波形的切点时间集合。从实际非对称短路电流离散数据点对应取得切点的瞬时值,从而构成两组切点集合,分别对应上、下两条包络线。

### 2.5 非对称短路电流特征参数计算

以2.4节计算得到的切点集合为基础,重复步骤2.3节获得经过切点修正的非对称短路电流包络线,即可通过图3所示的基于包络线计算非对称短路电流特征参数的方法求解非对称短路电流波形的有效值和直流分量。基于切点修正的非对称短路电流特征参数计算全流程见图4。

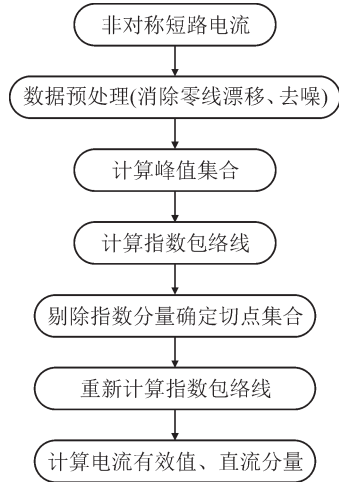


图4 非对称短路电流特征参数计算流程图

Fig. 4 Flowchart of calculating asymmetric short-circuit current characteristic parameters

### 3 比对结果验证

根据文[4], STL依据实际应用场景, 设计了软件TDG(test data generator), 即试验数据发生器, 用于测试非对称短路电流参数计算方法的准确性。其原理是给出短路电流表达式, 见式(8)。通过设置不同的参数可以生成覆盖大多数大容量试验工况的标准短路电流波形, 并通过理论计算给出了每个波形的特征参数, 包括峰值点处的峰值、时间、交流分量有效值和直流分量百分数的参考值<sup>[4, 10]</sup>。文中使用这些波形作为标准数据源、给定的参考值作为真值, 测试包络线修正后新算法的准确性。

$$i = [(I_k'' - I_k') \exp(-t/\tau_{ac}'') + (I_k' - I_d) \exp(-t/\tau_{ac}') + I_d] \cdot \sin[2\pi t(f_0 + t/T \cdot \Delta f) - \phi] + I_k'' \sin(\phi) \exp(-t/\tau_{dc}) + noise + offset \quad (8)$$

#### 3.1 非对称短路电流峰值的计算验证

按照2.1节对非对称短路电流波形进行预处理后, 采用2.2节所描述的方法计算非对称短路电流峰值和时间参数, 见图5。虽然该部分在文[8]中已有介绍, 并不是文中讨论的重点, 但是电流峰值和时间作为计算包络线的基础, 其计算准确度对电流有效值和直流分量的提取也至关重要。

以TDG提供的第一个电流数据为例,  $I_k'' = I_k' = I_d = 1 \text{ kA}$ ,  $\tau_{ac}'' = 16 \text{ ms}$ ,  $\tau_{ac}' = 400 \text{ ms}$ ,  $\tau_{dc} = 45 \text{ ms}$ , 噪音=0, 偏置=0。基于2.2节所述的方法计算出来的电流峰值和峰值时间及其参考值见表1。结果只取前6个峰值, 因为随着直流分量的衰减, 不同方法的差异越来越小, 且在电力系统中认为直流分量低于20%可不考虑其非对称性<sup>[2]</sup>。

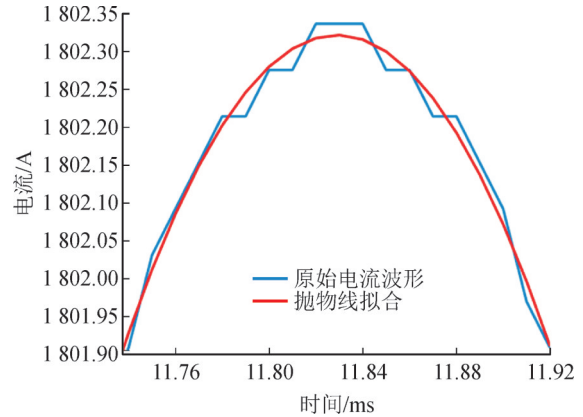


图5 基于抛物线的短路电流峰值拟合结果

Fig. 5 Fitting results of short-circuit current peak based on parabola

表1 非对称短路电流峰值和峰值时间计算结果

Table 1 Calculation results of asymmetric short-circuit current peak value and peak time

电流峰值			峰值时间		
计算值/kA	参考值/kA	相对误差/%	计算值/ms	参考值/ms	相对误差/%
1.802 3	1.802 3	0	298.187 5	298.188 5	0.34×10 <sup>-3</sup>
-0.359 8	-0.359 8	0	401.437 5	401.439 6	0.52×10 <sup>-3</sup>
1.514 1	1.514 1	0	498.852 9	498.840 6	2.47×10 <sup>-3</sup>
-0.589 3	-0.589 3	0	600.911 8	600.924 0	2.03×10 <sup>-3</sup>
1.329 5	1.329 5	0	699.250 0	699.257 4	1.06×10 <sup>-3</sup>
-0.736 6	-0.736 6	0	800.617 6	800.592 8	3.09×10 <sup>-3</sup>

从计算结果来看, 在电流峰值方面, 由于TDG参考值只给出了小数点后4位有效数字, 在此基础上计算值和参考值没有偏差; 在峰值时间方面, TDG给出了6位有效数字, 由此对比分析得到的最大偏差为0.003 09%, 相对误差非常小, 证明2.2节中方法有效, 为后续有效值和直流分量计算奠定了准确的电流峰值和时间的基础。

#### 3.2 非对称短路电流有效值和直流分量的计算验证

根据2.3节和2.4节的计算方法, 将非对称短路电流中直流分量剔除, 仅剩余对称交流分量见图6。按照2.2节所述方法重新计算峰值和峰值时间, 此时获得的峰值时间为包络线与原始波形的真实切点时间, 以该时间数据索引获得原始波形对应时刻的数值, 即得到包络线的真实切点数据集, 真实切点见图7。然后, 按照2.3节的方法重新计算修正后的多指数函数的拟合包络线, 根据式(2)、(3)可以计算电流波形上任意时刻的有效值和直流分量。

仍以TDG提供的第一个电流数据为例, 按照切点修正的方法计算峰值处有效值和直流分量, 并与文[5, 8]的计算结果和参考值进行对比分析, 对比结果见表2、3。

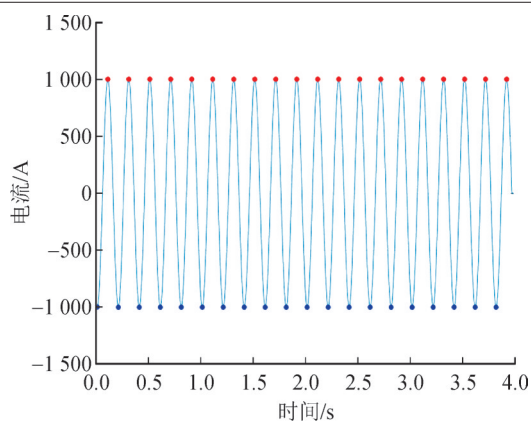


图6 非对称短路电流对称交流分量

Fig. 6 Symmetrical a.c. component of asymmetric short-circuit current

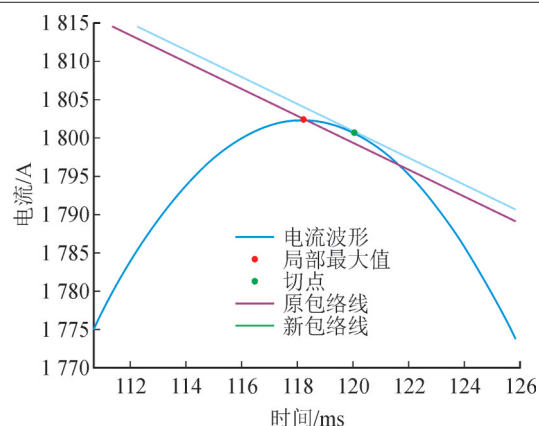


图7 非对称短路电流修正后的包络线

Fig. 7 The corrected envelope of asymmetric short-circuit current

表2 电流有效值计算结果及相对误差

Table 2 Calculation results of RMS of current and relative error

参考值/kA	修正前/kA	相对误差/%	修正后/kA	相对误差/%	文[5]电流/kA	相对误差/%	文[8]电流/kA	相对误差/%
0.707 1	0.705 8	0.184	0.706 8	0.042	0.705 8	0.184	0.705 7	0.184
0.707 1	0.706 8	0.042	0.707 2	0.014	0.706 4	0.100	0.705 9	0.156
0.707 1	0.706 7	0.057	0.707 1	0	0.706 5	0.085	0.706 2	0.113
0.707 1	0.706 7	0.057	0.707 0	0.014	0.706 8	0.042	0.706 3	0.099
0.707 1	0.706 9	0.028	0.707 0	0.014	—	—	0.706 5	0.071
0.707 1	0.707 0	0.014	0.707 1	0	—	—	0.706 5	0.071

表3 直流分量计算结果及相对误差

Table 3 Calculation results of DC component and relative error

参考值/kA	修正前/kA	相对误差/%	修正后/kA	相对误差/%	文[5]误差/%	相对误差/%	文[8]误差/%	相对误差/%
80.073 7	80.574 6	0.625	80.460 4	0.481	80.543 7	0.584	80.532 0	0.572
64.118 0	63.988 0	0.203	63.933 4	0.289	63.984 3	0.209	64.010 1	0.168
51.341 7	51.491 5	0.292	51.464 8	0.239	51.525 7	0.357	51.552 7	0.411
41.111 2	41.032 8	0.191	41.022 2	0.217	41.048 9	0.152	41.066 9	0.108
32.919 3	32.989 7	0.214	32.990 2	0.215	—	—	33.001 5	0.250
26.359 7	26.329 7	0.114	26.335 2	0.093	—	—	26.339 2	0.078

从以上计算结果看,在电流有效值计算方面,修正前的计算结果相对误差范围在0.014%~0.184%之间,误差较小,但仍有改进空间。修正后的计算结果相对误差显著降低,范围在0%~0.042%之间,表明修正方法有效提高了计算精度。与文[5]的对比发现,文[5,8]的相对误差范围分别在0.042%~0.184%和0.071%~0.184%之间,修正后的结果优于文[5,8]的结果,表明修正方法具有更高的准确性。修正后的结果与参考值几乎完全一致(部分相对误差为0%),说明修正方法对电流有效值的计算具有显著的优化作用。

在直流分量计算方面,修正前的计算结果相对误差范围在0.114%~0.625%之间,误差相对较大。

修正后的计算结果相对误差有所降低,范围在0.093%~0.481%之间,但仍存在一定误差。与文[5,8]的结果对比,文[5,8]的相对误差范围分别在0.152%~0.584%和0.078%~0.572%之间,修正后的偏差与文[5,8]的结果相比略小,并未显著优于文[5],说明修正方法对直流分量的计算也有一定的优化作用,但效果不如对电流有效值的优化显著。

#### 4 结语

文中通过理论计算得出非对称短路电流包络线的真实切点时刻应为其对称分量的峰值时刻,基于此论点提出了新的非对称短路电流参数计算方

法,对比已经发表的文献<sup>[5,10]</sup>,该方法对电流有效值的计算有显著优化效果,可明显降低误差,证明了该论点及方法的有效性。直流分量的个别点的计算结果大于文[5],但符合导则<sup>[4]</sup>的要求。该方法计算电流有效值的相对误差由原方法的0.014%~0.184%降低至0%~0.042%;直流分量的相对误差从0.114%~0.625%降至0.093%~0.481%。这种方法为非对称短路电流参数的高准确度计算提供了有效的解决方案,尤其适用于直流分量时间常数超标的复杂工况。

### 参考文献:

- [1] 黄实,高享想,刘浩军,等.非对称电流开断试验T100a电流零点 $di/dt$ 及TRV峰值 $u_c$ 的计算[J].高压电器,2015,51(10):163-167.  
HUANG Shi, GAO Xiangxiang, LIU Haojun, et al.Calculation of  $di/dt$  at current Zero and TRV peak value  $U_C$  for test-duty T100a [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 163-167.
  - [2] 高压交流断路器:GB/T 1984—2024[S].2024.  
High-voltage alternating-current circuit-breakers: GB/T 1984—2014[S].2014.
  - [3] High-voltage switchgear and controlgear-Part100: Alternating-current circuit-breakers: IEC 62271-100: 2021[S].2021.
  - [4] STL Technical Report. Harmonization of data processing methods for high power laboratories[R].S.I.I.: Short-circuit Licuson Technical Committe, 2003.
  - [5] 周小猛,林志力,苗本健,等.大容量试验短路电流波形参数的测算[J].高压电器,2019,55(7):227-234.  
ZHOU Xiaomeng, LIN Zhili, MIAO Benjian, et al.Measurement and calculation of short-circuit current waveform parameters for high power tests[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 227-234.
  - [6] 蔡梦怡,杨为,贾转转,等.基于半波法的非对称短路试验电流交直流分量特征参数计算方法研究[J].电能与能效管理技术, 2019(11):53-56.
  - [7] 吴少涛.电力系统不对称短路电流计算方法研究[J].机电信息, 2015(30):10-12.  
WU Shaotao.Research on calculation methods of asymmetric short-circuit current in power systems[J]. Mechanical and Electrical Information, 2015(30): 10-12.
  - [8] 王晶,牟磊,李彦明,等.大容量实验室电流波形参数计算机提取算法的研究[J].高压电器,2006,42(1):44-46.  
WANG Jing, MU Lei, LI Yanming, et al.Computation methods of current waveform parameters in high power laboratory[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(1): 44-46.
  - [9] 高电压和大电流试验技术 第4部分:试验电流和测量系统的定义和要求:GB/T 16927.4—2014[S].2014.  
High voltage and high current test techniques—Part 4: Definitions and requirements for test currents and measuring systems: GB/T 16927.4—2014[S].2014.
  - [10] GODA Y, KIM M H, WANG An, et al.Comparison tests of high current shunts in high power laboratories in Asia with an STL reference shunt[C]//2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition.USA: IEEE, 2012: 1-8.
- 郭双权(1990—),男,硕士,工程师,研究方向为配网物资质量检测、故障诊断(E-mail: 1246420912@qq.com)。  
陈家伟(1970—),男,本科,工程师,研究方向为高压电器产品试验检测(E-mail: chenjiawei@xihari.com)。  
阎对丰(1984—),男,博士研究生,主要从事高电压试验技术、断路器状态评估方面的研究(通信作者)(E-mail: yanduifeng@xihari.com)。  
马建军(1996—),男,硕士,工程师,研究方向为配网物资质量检测、故障诊断。
- 
- (上接第198页)
- [22] 梁黄彬,谢强,何畅,等. $\pm 800$  kV特高压直流穿墙套管的地震易损性分析[J].地震工程与工程振动,2020,40(2):91-100.  
LIANG Huangbin, XIE Qiang, HE Chang, et al.Seismic vulnerability analysis of  $\pm 800$  kV ultra-high voltage direct current(UHVDC) wall bushing[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2020, 40(2): 91-100.
  - [23] 陆祝贤,吴轶,杨春,等.基于IDA的阀厅结构地震易损性分析[J].土木工程学报,2012(s1):263-267.  
LU Zhuxian, WU Yi, YANG Chun, et al. Seismic fragility analysis of valve hall structure based on IDA[J]. China Civil Engineering Journal, 2012(s1): 263-267.
  - [24] 电力设施抗震设计规范:GB 50260—2013[S].2013.  
Code for design of seismic of electrical installations: GB 50260—2013[S].2013.
  - 邱有强(1979—),男,高级工程师,主要直流输电设备可靠性研究以及西电东送主网架生产管理工作(E-mail: qiuyouqiang@im.ehv.csg)。
  - 李强(1992—),男,工程师,主要从事直流输电关键技术、设备抗震研究工作(E-mail: liqiang1@im.ehv.csg)。
  - 杨旭(1984—),女,高级工程师,主要从事直流输电关键技术、设备抗震研究工作(E-mail: yangxu@im.ehv.csg)。
  - 黎卫国(1987—),男,高级工程师,主要从事高电压技术试验研究工作(E-mail: liweiguo2005@163.com)。
  - 王金雄(1979—),男,高级工程师,主要从事换流站运行维护、科技研究工作(E-mail: wangjinxiong@im.ehv.csg)。
  - 张世洪(1992—),男,工程师,主要从事直流输电关键技术、设备抗震研究工作(通信作者)(E-mail: zhangshihong@im.ehv.csg)。